

复合材料原理



江苏大学材料学院

第二章 复合材料的复合原理及界面

2.1 复合原则

2.2 弥散增强及颗粒增强原理

2.3 单向连续纤维增强原理

2.4 短纤维增强原理

2.5 混杂增强原理

2.6 复合材料界面及其改性

2.7 复合材料界面表征

思考题：

- 1、混杂增强希望达到的目的是什么？试举例分析。
- 2、试分析长纤维与颗粒混杂增强的优势和不足。
 - 1、充分利用不同增强体的性能优势，获得比单一复合更加优异的综合性能。
 - 2、优势：获得良好单向性能的同时，获得良好的基体性能。不足：长纤维增强的制备成本高，颗粒增强使成型难度更大。

2.6 复合材料界面及其改性

- ❖ 界面的基本概念
- ❖ 复合材料的界面粘结机理
- ❖ 聚合物基复合材料的界面改性
- ❖ 金属基复合材料的界面改性
- ❖ 层状复合材料的界面

一、界面的基本概念

- ❖ 复合材料的界面是指基体与增强体之间化学成起载荷
- ❖ 寸的，
或一个
。

界面通常可能包含以下几个部分：

- 1、基体和增强体的部分**原始接触面**；
- 2、基体与增强体相互作用生成的**反应产物与基体及增强体的接触面**；
- 3、基体和增强体的**互扩散层**；
- 4、增强体上的**表面涂层**；
- 5、基体和增强体上的**氧化物**及它们的反应产物之间的**接触面**等。

- 在化学成分上，除了基体、增强体及涂层中的元素外，还有基体中的合金元素和杂质、由环境带来的杂质。
- 这些成分或以原始状态存在，或重新组合成新的化合物。
- 界面上的化学成分和相结构非常复杂。

复合材料界面的作用可以归纳为以下几种效应：

1、**传递效应** 界面能传递力，即将外力传递给增强体，起到基体和增强体之间的桥梁作用。

2、**阻断效应** 结合适当的界面有阻止裂纹扩展、中断材料破坏、减缓应力集中的作用。

3、**不连续效应** 在界面上产生物理性能的不连续性等现象，如抗电性、耐热性、尺寸稳定性等。

4、**散射和吸收效应** 光波、声波、热弹性波、冲击波等在界面产生散射和吸收，如透光性、隔热性、隔音性、耐机械冲击及耐热冲击性等。

5、**诱导效应** 一种**物质**(通常是增强体)的**表面结构**使另一种(通常是基体)与之接触的物质**的结构**由于诱导作用而发生改变，由此产生一些现象，如强的弹性、低的膨胀性、耐冲击性和耐热性等。

界面上产生的这些效应，是任何一种单体材料所

如在粒子弥散强化金属中，微细粒子阻止晶格位错，从而提高复合材料强度；

在纤维增强塑料中，纤维与基体界面阻止裂纹进一步扩展等。

➤ **界面效应**既与界面结合状态、形态和物理-化学性质

➤

- **复合材料的界面**并不是一个单纯的几何面，而是一个**多层结构的过渡区域**。
- 界面区是从与增强体内部性质不同的某一点开始，直到与基体内整体性质相一致的点间的区域。
- 界面区域的结构与性质不同于两相中的任一相，结构上这一**界面区由五个亚层组成**。

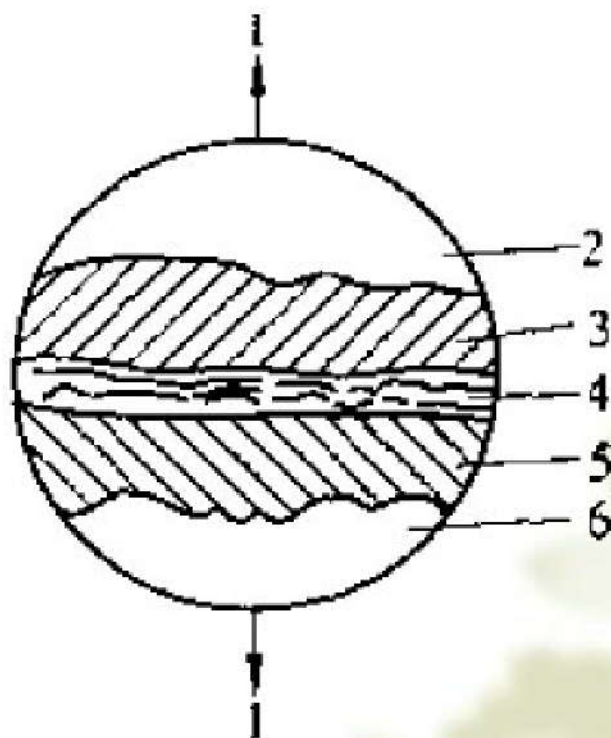


图1 界面区域示意图

1—外力场； 2—基体； 3—基体表面区； 4—相互渗透区； 5—增强体表面； 6—增强体

- 基体和增强体**通过界面**结合在一起，构成复合材料整体，**界面结合的状态和强度**对复合材料的性能有重要影响。
- 对于各种复合材料都要求有**合适的界面结合强度**。
- **界面的结合强度**一般是以分子间力、表面张力(表面自由能)等表示的，而实际上有许多因素影响着界面结合强度。

影响界面结合强度的因素

- 表面的几何形状、分布状况、纹理结构；
- 表面吸附气体和蒸气程度；
- 表面吸水情况，杂质存在；
- 表面形态在界面的溶解、浸透、扩散和化学反
—
- 表面层的力学特性，润湿速度等。

- 由于**界面区**相对于整体材料所占比重甚微，欲单独对**界面区**某一性能进行度量有很大困难。
- 常借于**整体材料的力学性能**来表征界面性能，如**层间剪切强度(ILSS)**就是研究界面
- 如再能配合**断裂形貌分析**等即 _____ 作较深入的研究。

- 通过**力学分析**可看出，**界面性能较差的材料**大多呈剪切破坏，且在材料的断面可观察到**脱粘、纤维拔出、纤维应力松弛**等现象。
- 但**界面间粘结过强的材料**呈脆性也降低了材料的复合性能。
- **界面最佳状态**的衡量是当受力发生开裂时，这一裂纹能转为区域化而不使界面进一步脱粘。
- 这时的复合材料具有**最大断裂能和一定的韧性**。

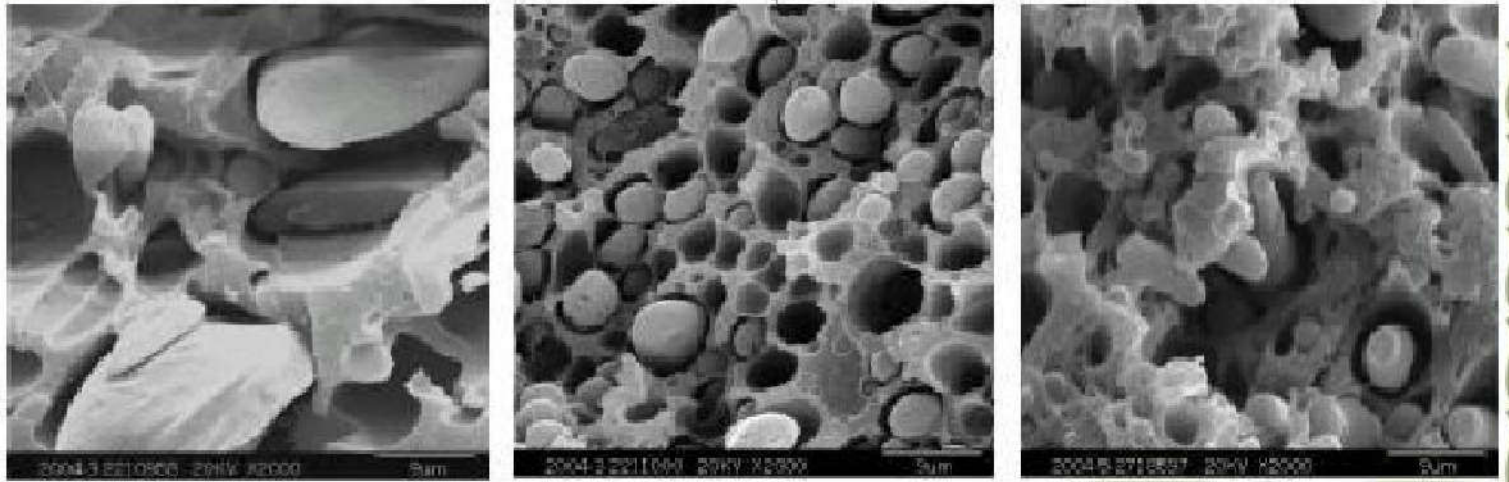


图2 聚碳酸酯（PC）/PP共合金形态结构的SEM照片

- 在研究和设计界面时，不应只追求界面粘结而应考虑到最优化和最佳综合性能。
- 由于界面尺寸很小且不均匀、化学成分及结构复杂、力学环境复杂、对于界面的结合强度、界面的厚度、界面的应力状态尚无直接的、准确的定量分析方法。
- 对于界面结合状态、形态、结构以及它对复合材料性能的影响尚没有适当的试验方法，通常需要借助拉曼光谱、电子质谱、红外扫描、X射线衍射等分析手段逐步摸索和统一认识。

- 对于界面**成分和相结构**很难作出全面的分析。
- 到目前为止，对复合材料界面的认识还是很不充分的，不能以一个通用的模型来建立完整的理论。
- 尽管存在很大的困难，但由于**界面的重要性**，所以吸引着大量研究者致力于认识界面的工作。

二、复合材料的界面粘结机理

- 浸润性是表示液体在固体表面上铺展的程度。
- 好的浸润性意味着液体(基体)将在增强材料上铺展开来，并

_____的
_____的
话，就会发生基体对增强材料的浸润。

一滴液体滴落在一个固体表面上时，原来固-气接触界面将被液-固界面和液-气界面所代替，用 γ_{LG} 、 γ_{SG} 、 γ_{SL} 分别代表液-气、固-气和固-液的比表面能或称表面张力(即单位面积的能量)。

按照热力学条件，只有体系自由能减少时，液体才能

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} < \gamma_{SG}$$

因此，铺展系数SC(Spreading Coefficient)被定义为：

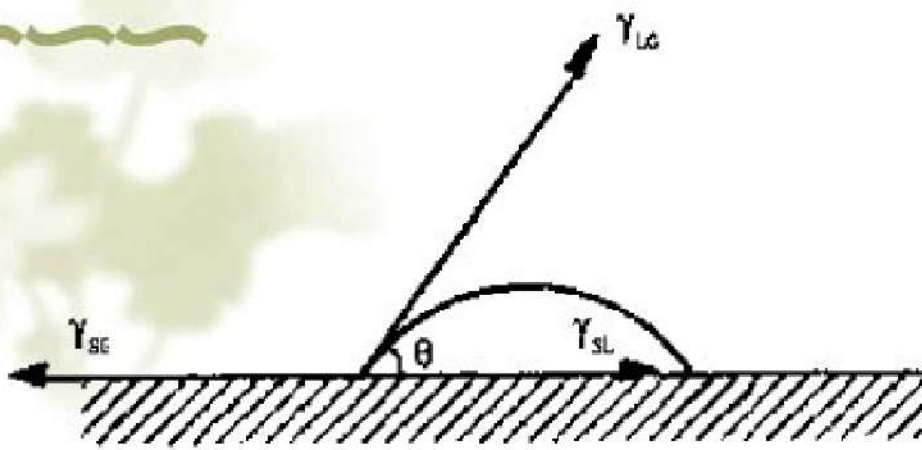
$$SC = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG})$$

只有当铺展系数 $SC > 0$ 时，才能发生浸润。不完全浸润的情况如下图所示，根据力平衡，可得

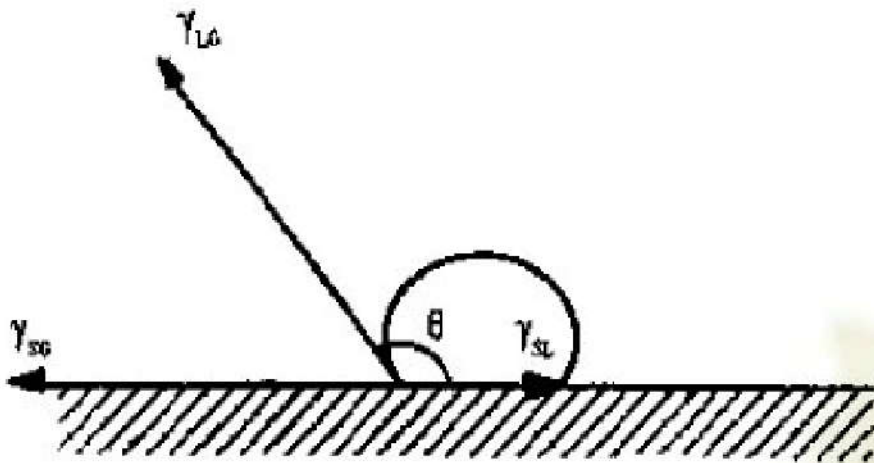
$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta$$

式中 θ 称为接触角。

$$\theta = \cos^{-1} [(\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}]$$



(a) 不完全浸润



(b) 不浸润

图2 不完全浸润(a)和不浸润(b)情况示意图

由 θ 可知浸润的程度：

$\theta = 0^\circ$ 时，液体完全浸润固体；

$\theta = 180^\circ$ 时 _____

$0^\circ < \theta < 180^\circ$ (部分浸润)，随角度下降，浸润的 _____

$\theta > 90^\circ$ 时， _____。

对于一个指定的体系，**接触角**随着**温度、保持时**

浸润性仅仅表示了**液体与固体发生接触时的情况**，
而并不能表示**界面的粘结性能**。

一种体系的**两个组元**可能有极好的浸润性，但它们之间的结合可能很弱，如范德华物理键合形式。

的必要条件，并非充分条件。

为了提高复合材料组元间的浸润性，常常通过对增强材料进行表面处理的方法来改善润湿条件，有时也可通过改变基体成分来实现。

多数陶瓷基复合材料中增强材料与基体之间不发生化

例如，如SiC晶须或SiC纤维增强SiC陶瓷，这种复合材料也希望建立一个合适的界面，即合适的粘接强度、界面层模量和厚度以提高

一般认为，陶
又能发生脱粘的界
的缺点。

当基体浸润增强材料后，紧接着便发生**基体与增强材料的粘结(Bonding)**。

粘结(或称**粘合**、**粘着**、**粘接**)是指**不同种类的两种材料相互接触并结合在一起**的一种现象。

对于一个给定的复合材料体系，同时可能会

变成反应粘结。

- ◆ 体系不同，粘结的种类或机理不同，这主要取决于基体与增强材料的种类以及表面活性剂(或称偶联剂)的类型等。
- ◆ 界面粘结机理主要有机械作用理论、静电作用理论、界面反应理论、浸润理论、可变形层理论、约束层理论等。

1. 机械作用理论

机械作用机理如图 3所示，当两个表面相互接触后，由于表面粗糙不平将发生机械互锁[interlocking)。很显然表面越粗糙，互锁作用越强，因此机械粘结作用越有效。



图3 界面粘结机理示意图
机械作用理论 (mechanical bonding)

在受到平行于界面的作用力时，机械粘结作用可达到最佳效果，获得较高的剪切强度。但若界面受拉力作用时，除非界面有如图中A处所示的‘锚固’形态，否则拉伸强度会很低。

在大多数情况下，纯粹机械粘结作用很难遇到，往往是机械粘结作用与其它粘结机理共同起作用。

2. 静电作用理论

当复合材料的基体及增强材料的表面带有异性电荷时，在基体与增强材料之间将发生静电吸引力，如图4所示。静电相互作用的距离很短，仅在原子尺度量级内静电作用力才有效。因此表面的污染等将大大减弱这种粘结作用。

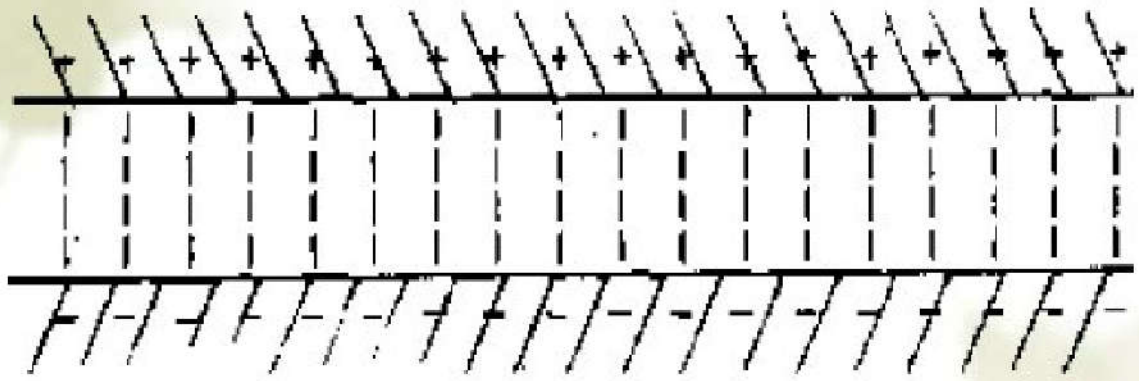


图4 界面粘结机理示意图
静电作用理论(electrostatic bonding)

3. 化学作用理论

化学作用是指增强材料表面的化学基(图5中标有x面)与基体表面的相容基(标有R面)之间的化学粘结。

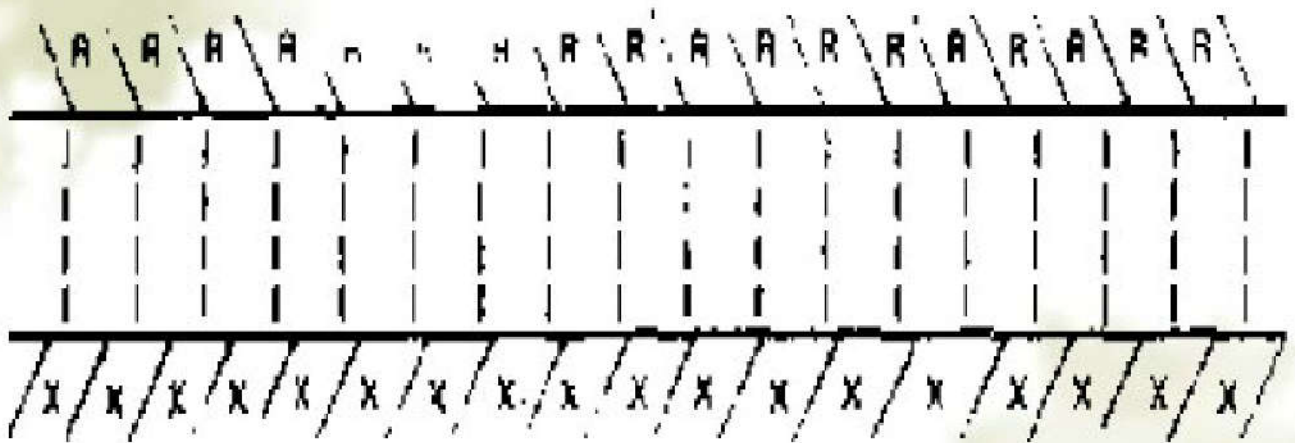


图5 界面粘结机理示意图

化学作用理论(chemical bonding) R、X分别代表相容的官能团

化学作用理论最成功的应用是偶联剂用于增强材料表面与聚合物基体的粘结。如硅烷偶联剂具有两种性质不同的官能团，一端为亲玻璃纤维的官能团(X)，一端为亲树脂的官能团(R)，将玻璃纤维与树脂粘结起来，在界面上形成共价键结合，如图6所示。

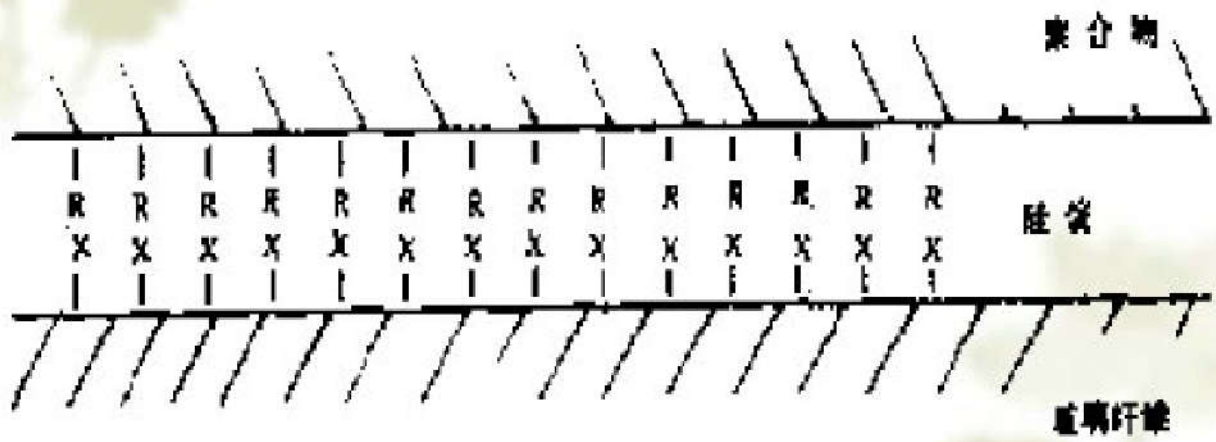


图6 界面粘结机理示意图

硅烷偶联剂产生的化学粘结

4. 界面反应或界面扩散理论

复合材料的基体与增强材料间可以发生原子或分子的互扩散或发生反应，从而形成反应结合或互扩散结合。对于聚合物来说，这种粘结机理可看作为分子链的缠结(如图7所示)。

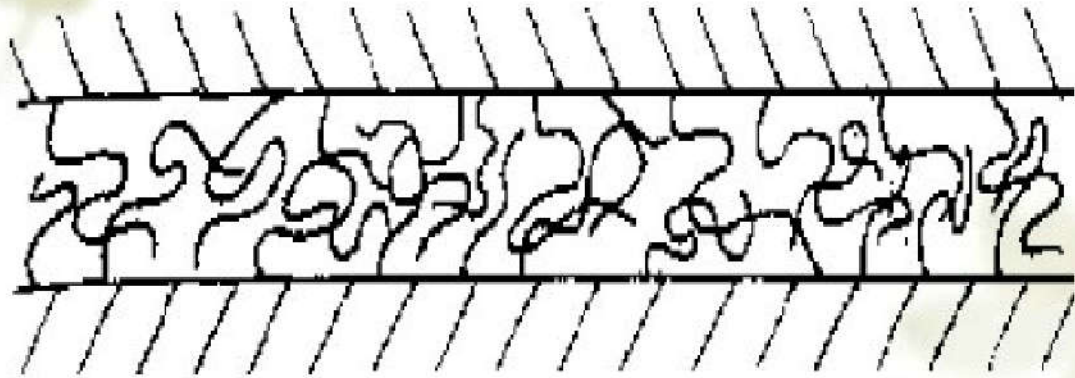


图7 界面粘结机理示意图

聚合物的反应粘结 (reaction bonding)

聚合物的粘结作用正如它的自粘作用一样是由于长链分子及其各链段的扩散作用所致。而对于金属和陶瓷基复合材料，两组元的互扩散可产生完全不同于任一原组元成分及结构的界面层(如图8所示)。

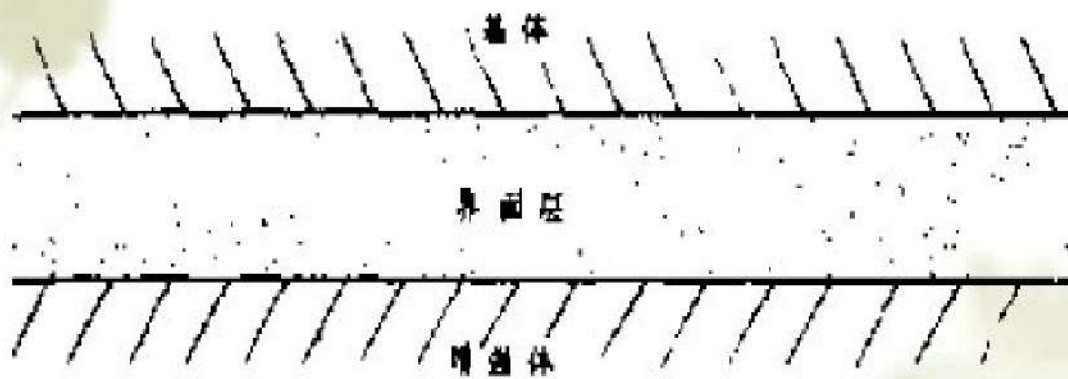


图8 界面粘结机理示意图

界面扩散形成的界面层

界面层的性能也与复合材料组元不同，对于金属基复合材料，这种界面层常常是 AB 、 AB_2 、 A_3B 类型的脆性的金属间化合物。

对于金属基和陶瓷基复合材料，形成界面层的主要原因之一是由于它们的生产制备过程不可避免地涉及到高温。

在高温下，扩散极易进行，扩散系数D随温度呈指数关系增加，按照Arrhenius方程

$$D = D_0 \exp(-Q / RT)$$

Q-扩散激活能. D_0 -常数, R-气体常数, T-温度。

温度明显影响着扩散系数，若 $Q=250\text{kJ/mol}$ ，并代入上式，则在 1000°C 时扩散系数 $D=2\times 10^{34}$ 。要比室温大得多。互扩散层的程度即反应层的厚度 x 取决于时间 t 和温度，可近似表示为

$$x = kt^{1/2}$$

k -反应速度常数，与扩散系数有关。

复合材料在使用过程中，尤其在高温使用时，界面会发生变化并可形成界面层，此外先前形成的界面层也会继续增长并形成复杂的多层界面。

上述理论有一定的实验支持，但也有矛盾之处。

如静电粘结理论的最有力证明是观察聚合物薄膜从各种表面剥离时所发现的电子发射现象，由电子发射速度算出剥离功大小与计算的粘结功值和实际结果相当吻合。

但是静电粘结理论不能解释非线性聚合物之间具有较高的粘结强度这一现象。

因此，每一种粘结理论都有它的局限性，这是因为界面相是一个结构复杂而具有多重行为的相。



2.6 复合材料界面及其改性

- ❖ 界面的基本概念
- ❖ 复合材料的界面粘结机理
- ❖ 聚合物基复合材料的界面改性
- ❖ 金属基复合材料的界面改性
- ❖ 层状复合材料的界面

思考题

传递应力、阻断裂纹、不连续效应、
散射和吸收、诱导效应

- 1、复合材料的界面在复合材料中能发挥怎样的作用？
- 2、复合材料的界面粘结机理有哪些？请举出一种加以说明。

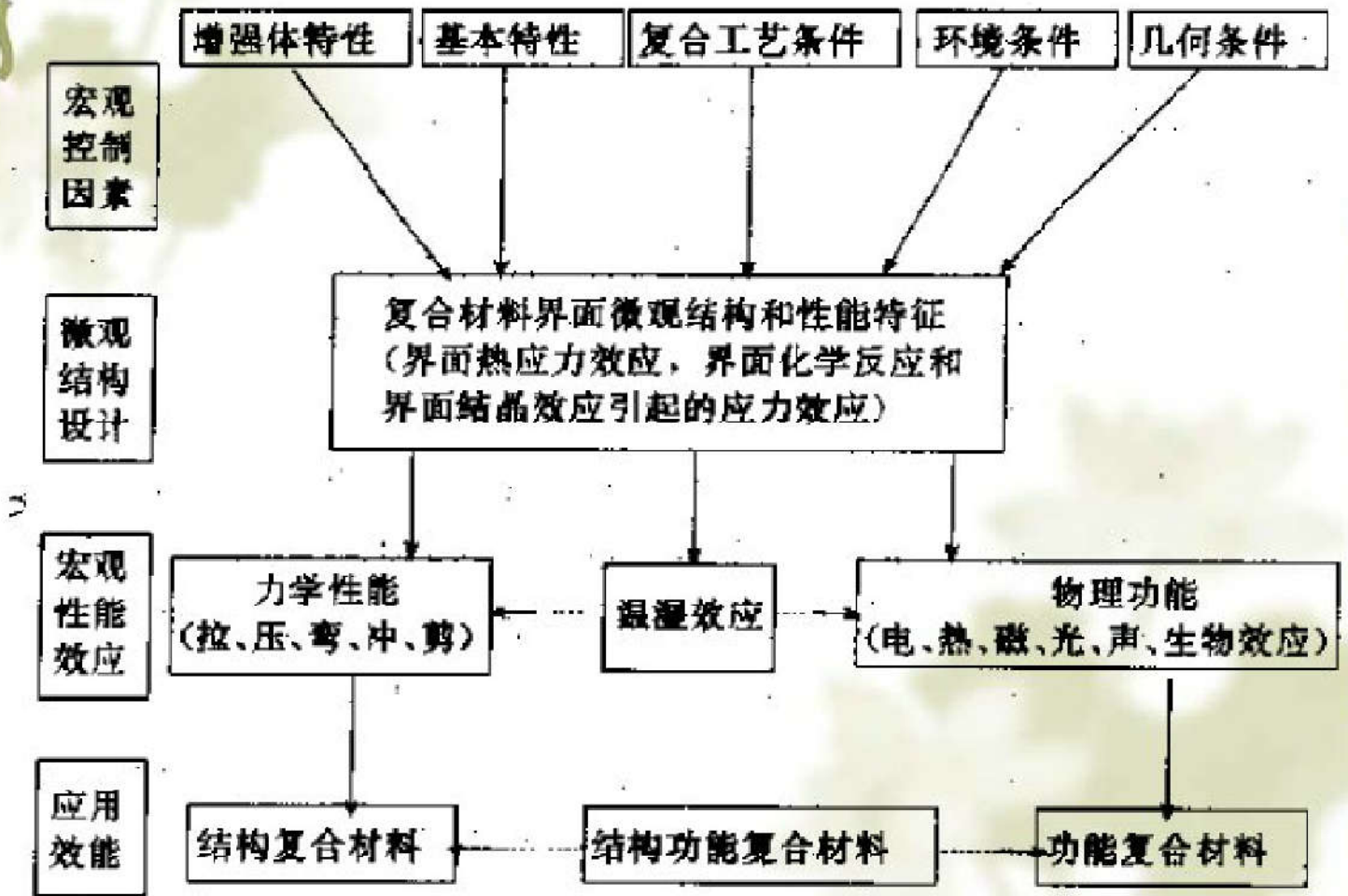
机械作用理论、静电作用理论、界面反应理论、
浸润理论、可变形层理论、约束层理论

三、聚合物基复合材料的界面改性

❖ 界面粘结强度是衡量复合材料中增强体与基体

❖ 的影响。

影响复合材料界面效应的因素




结构复合材料中，界面层的作用首先是

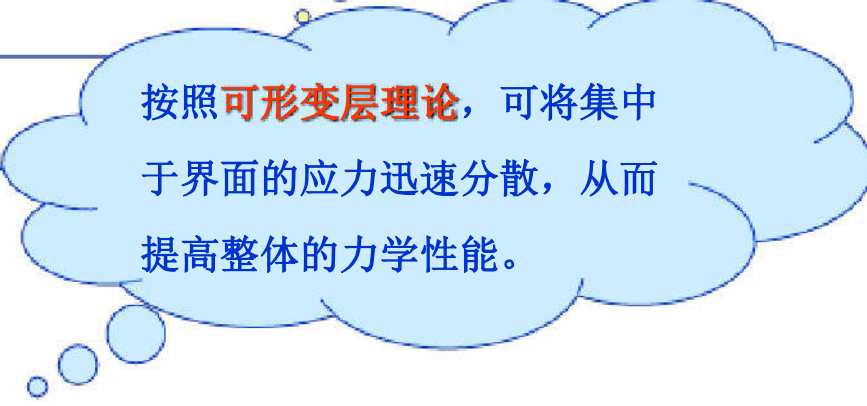
界面层的另一作用是在一定的应力条件下能够脱粘，这样就可以以____形式来吸收_____。这样就

从以上两方面综合考虑，则要求界面具有最佳粘接状态。

设计复合材料时，仅仅考虑到复合材料具有**粘接适度的界面层**还不够，还要考虑究竟**什么性质的界面层最为合适**。



从力学角度来看，
将会产生好的效果。



按照**可形变层理论**，可将集中于界面的应力迅速分散，从而提高整体的力学性能。

的形变。

前面的两种观点都有一定的实验支持，
但是尚未得到定论。

然而无论如何，若**界面层的模量高于增强材料和基体的模量**，将会产生不良的效果，这是大家都公认的观点。

在聚合物基复合材料的设计中，首先应考虑如何改善增强材料与基体间的浸润性。

对碳纤维表面涂覆惰性涂层和能与基体树脂发生反应或聚_____，活性涂层可能由于降低了相界面的浸润性而效果不良。

浸润不良将会在界面产生空隙，易产生应力集中而使复合材料发生开裂。

- 选择**合适的偶联剂**也很重要，所选处理增强材料表面的偶联剂应既含有能与增强材料起化学作用的官能团，又含有与聚合物基体起化学作用的官能团。
- 玻璃纤维使用硅烷作为偶联剂可使复合材料的性能大大改善，碳纤维经氧化处理或等离子体处理以及适当的涂层都可以收到很好的效果。

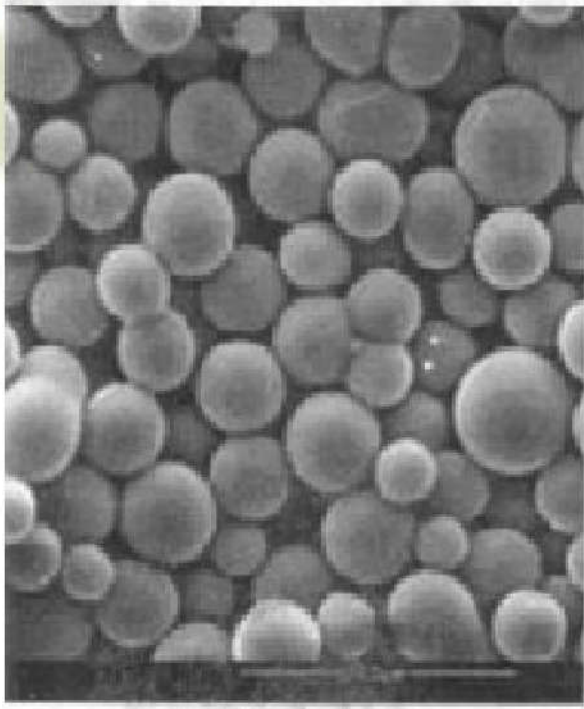


碳纤维经过空气表面氧化后，其表面物理、化学状态均发生了变化，比表面积增加，表面粗糙度增加，含氧官能团的种类和数量也有所增加，这些因素都会促进聚合物基复合材料界面结合强度的提高，纤维/基体界面结合对总性能有很大的影响，从而使复合材料的综合力学性能也相应提高。

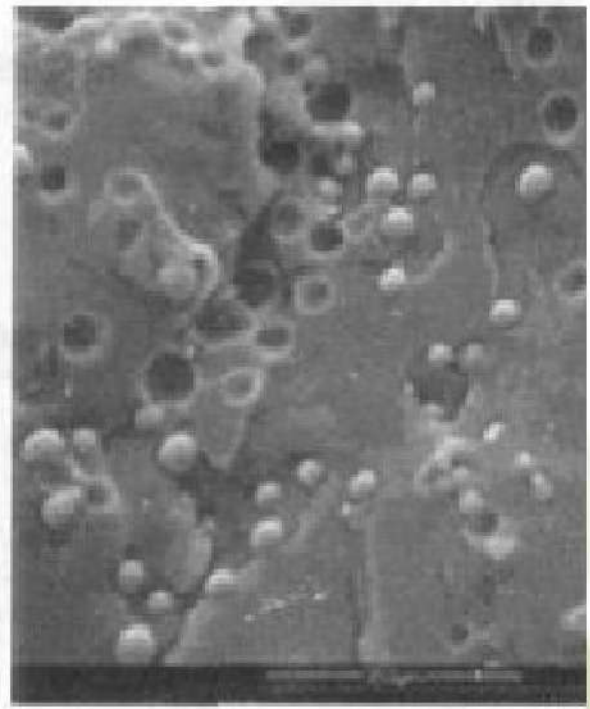
- 在制备**聚合物基复合材料**时，一般是把**聚合物(液态树脂)**均匀地浸渍或涂刷在**增强材料**上。
- **树脂对增强材料的浸润性**是指树脂能否均匀地分布在增强材料的周围，这是树脂与增强材料能否形成良好粘结的重要前提。

- ❖ 在复合材料成型过程中形成的**界面残余应力**，会使界面传递应力的能力下降，最终导致复合
- ❖ 在增强纤维与基体之间引入一 _____，在应力作用下吸收导致微裂纹增长的能量，从而抑制微裂纹的扩展。
- ❖ 控制复合材料成型过程的冷却方式，或者对复合材料进行适当的热处理，将可能消除或者减弱界面内应力，有效提高复合材料的剪切屈服强度，避免力学性能降低。

- ❖ 二氧化硅颗粒（**硅微粉**）在工程塑料中有广泛的应用。
- ❖ 二氧化硅的表面改性一般采用一定的有机物，通过合适的工艺方法使其吸附在 SiO_2 颗粒表面或直接与 SiO_2 表面的羟基发生化学反应，减少颗粒表面硅醇基数量。
- ❖ 表面化学改性可采用醇酯法、硅烷偶联剂或硅烷偶联剂聚合物复合改性等方法。
- ❖ 将超细二氧化硅的硅烷偶联剂改性法和聚合物包覆法结合起来，有目的地对超细二氧化硅表面接枝不同性能的聚合物，具有接枝包敷完全、分散程度好等优点。



a - SiO_2 颗粒



b - 未改性体系

图 二氧化硅(SiO_2)/环氧树脂复合材料

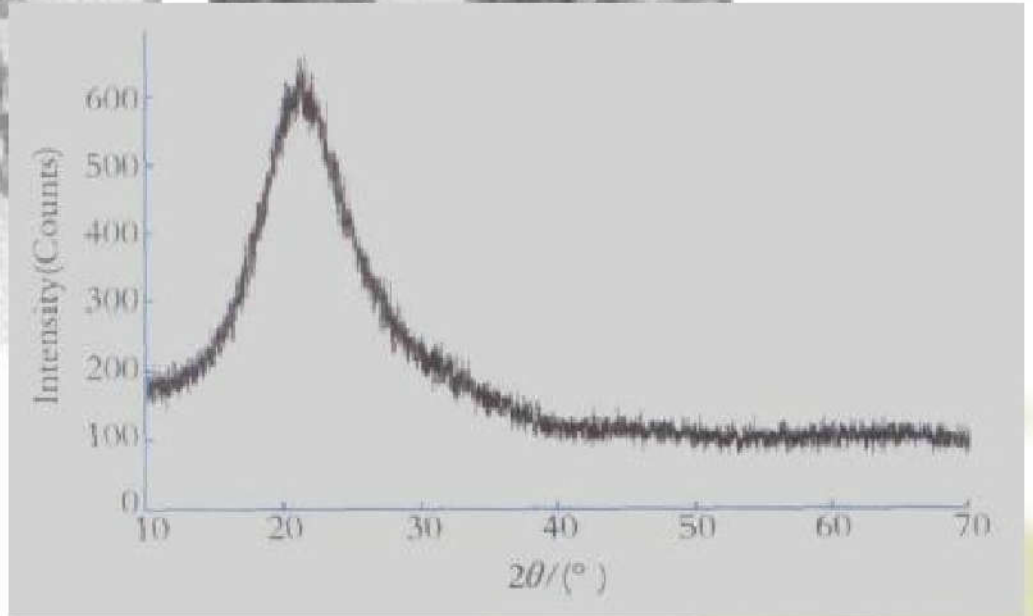
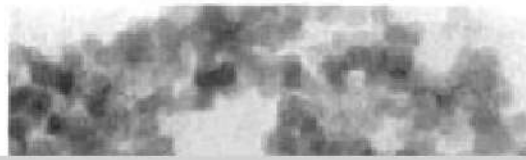
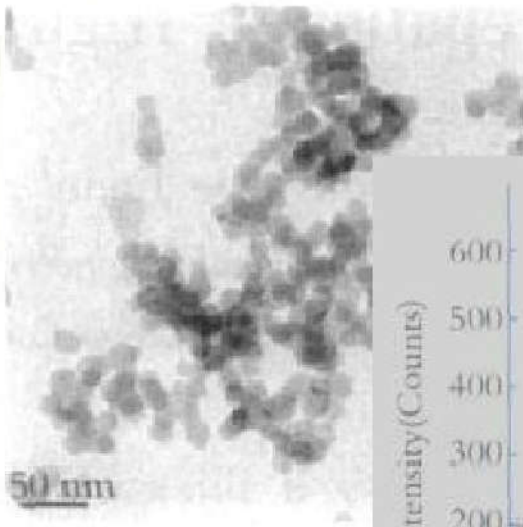


图 高纯纳米 SiO_2 的TEM照片和XRD谱

几种现代分析方法

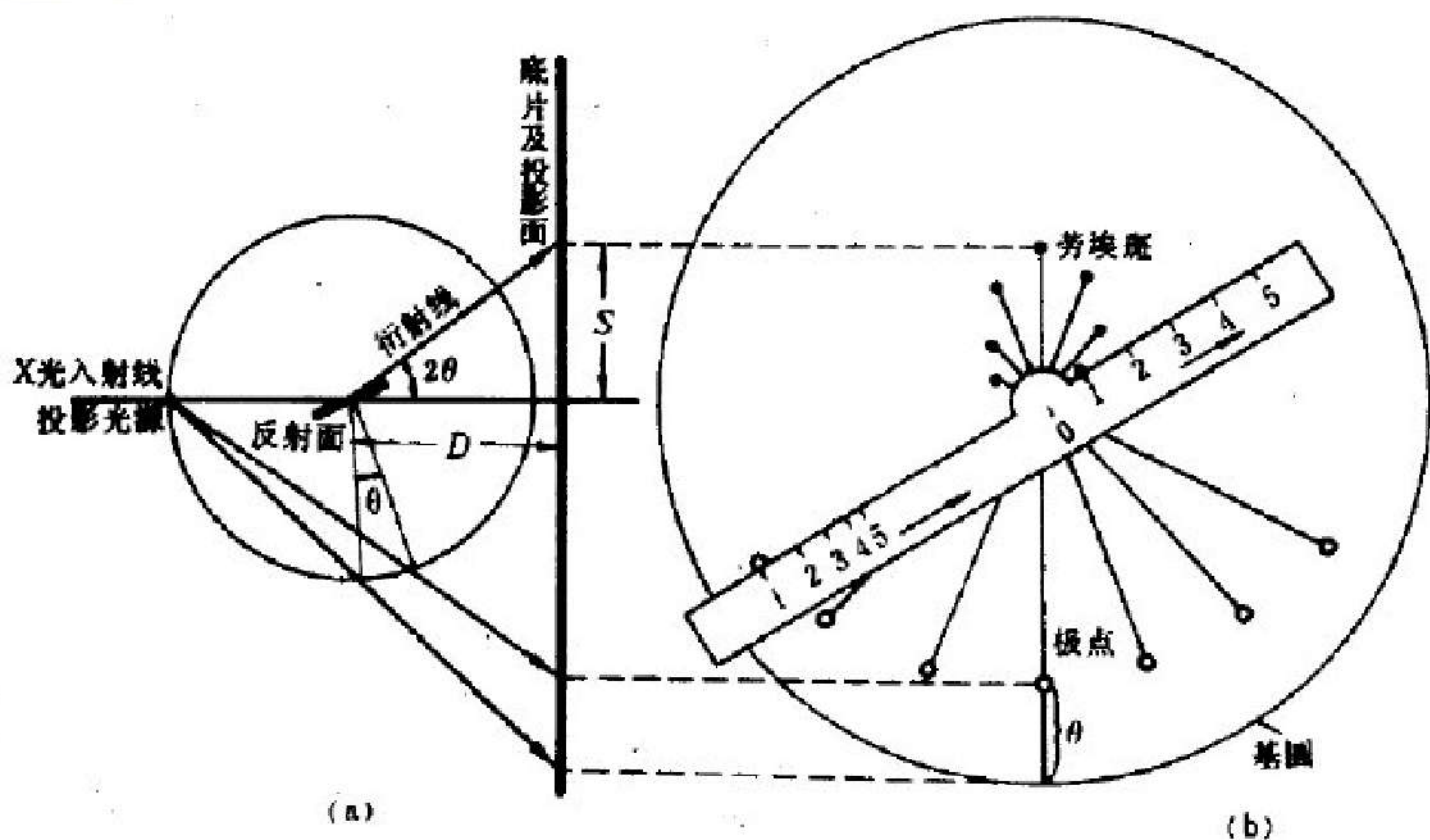
1、X射线衍射

- ❖ **X射线**照射在物体表面一定深度范围内，经不同程度反射，可以定性定量分析物质的组成，也可以分析材料表面的应力状态等。
- ❖ X射线是一种**波长很短**(约为 $20\sim 0.02\text{nm}$)的电磁波，能穿透一定厚度的物质，并能使荧光物质发光、照相乳胶感光、气体电离。
- ❖ 晶体可以作为X射线的空间衍射光栅，即当一束X射线通过晶体时将发生衍射，衍射波叠加的结果使射线的强度在某些方向上加强，在其他方向上减弱。分析在照相底片上得到的衍射花样，便可确定晶体结构。



图 X射线衍射仪

透射劳埃照片上的劳埃斑和与其对应的晶面极点



(a)透射劳埃照相与反射晶面的极射投影的布局 (b)逆投影光线和衍射线观察图(a)所得

- ❖ **取向分析** 包括测定单晶取向和多晶的结构（见择优取向），如测定硅钢片的取向。另外，为研究金属的范性形变过程，如孪生、滑移、滑移面的转动等，也与取向的测定有关。
- ❖ **晶粒（嵌镶块）大小和微观应力的测定** 由衍射花样的形状和强度可计算晶粒和微应力的尺寸。在形变和热处理过程中这两者有明显变化，它直接影响材料的性能。
- ❖ **宏观应力的测定** 宏观残留应力的方向和大小，直接影响机器零件的使用寿命。利用测量点阵平面在不同方向上的间距的变化，可计算出残留应力的尺寸和方向。

2、拉曼光谱

- ❖ 拉曼光谱（Raman spectra），是一种散射光谱。拉曼光谱分析法是基于印度科学家C.V.拉曼（Raman）所发现的拉曼散射效应。
- ❖ 对与入射光频率不同的散射光谱进行分析以得到分子振动、转动方面信息，并应用于分子结构研究的一种分析方法。
- ❖ 拉曼光谱能够提供快速、简单、可重复、无损伤的定性定量分析。
- ❖ 拉曼光谱应用在有机化学、高聚物以及表面和薄膜等方面。

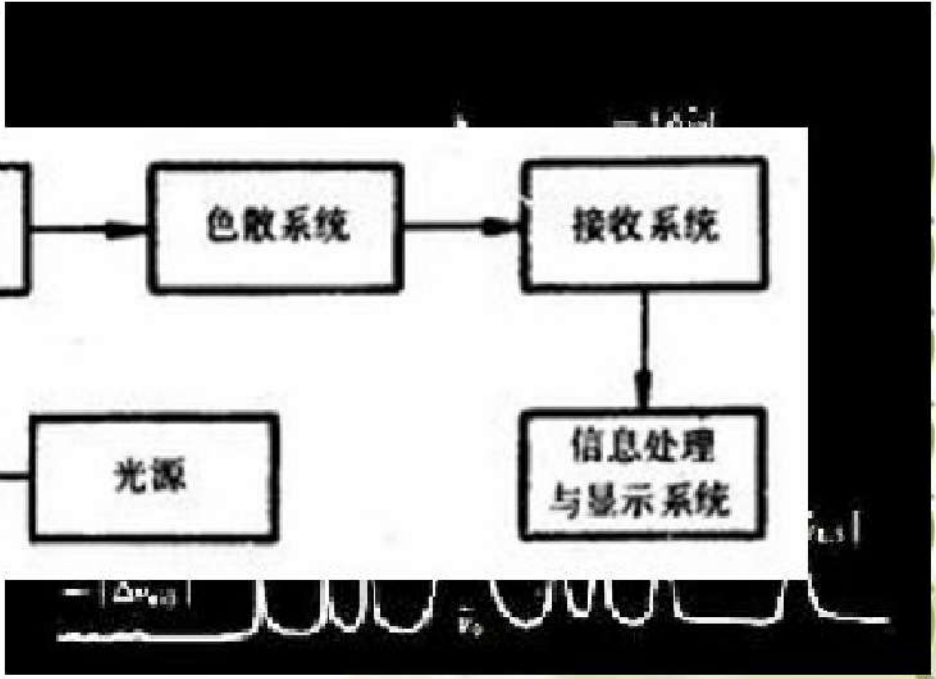
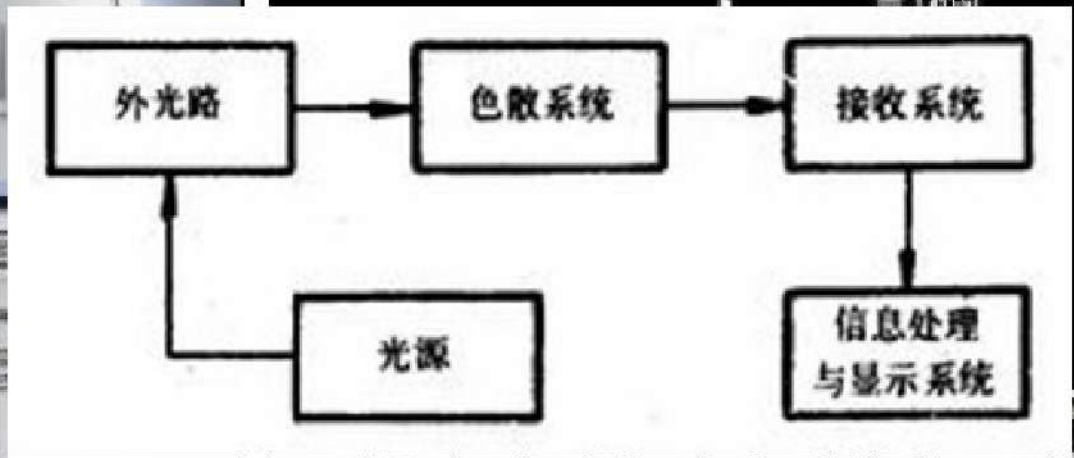
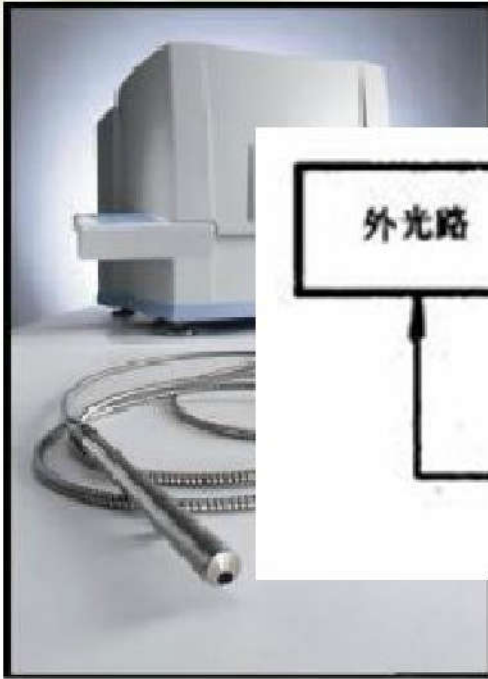
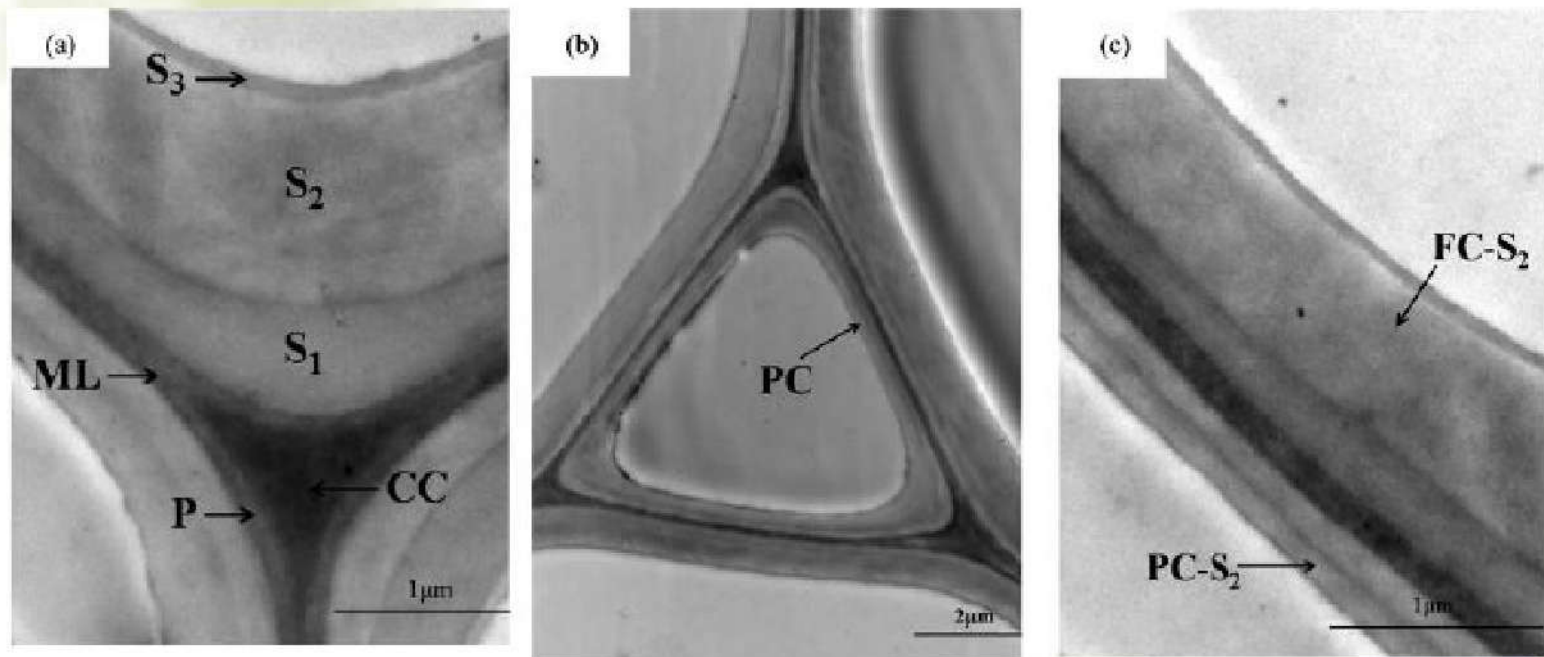
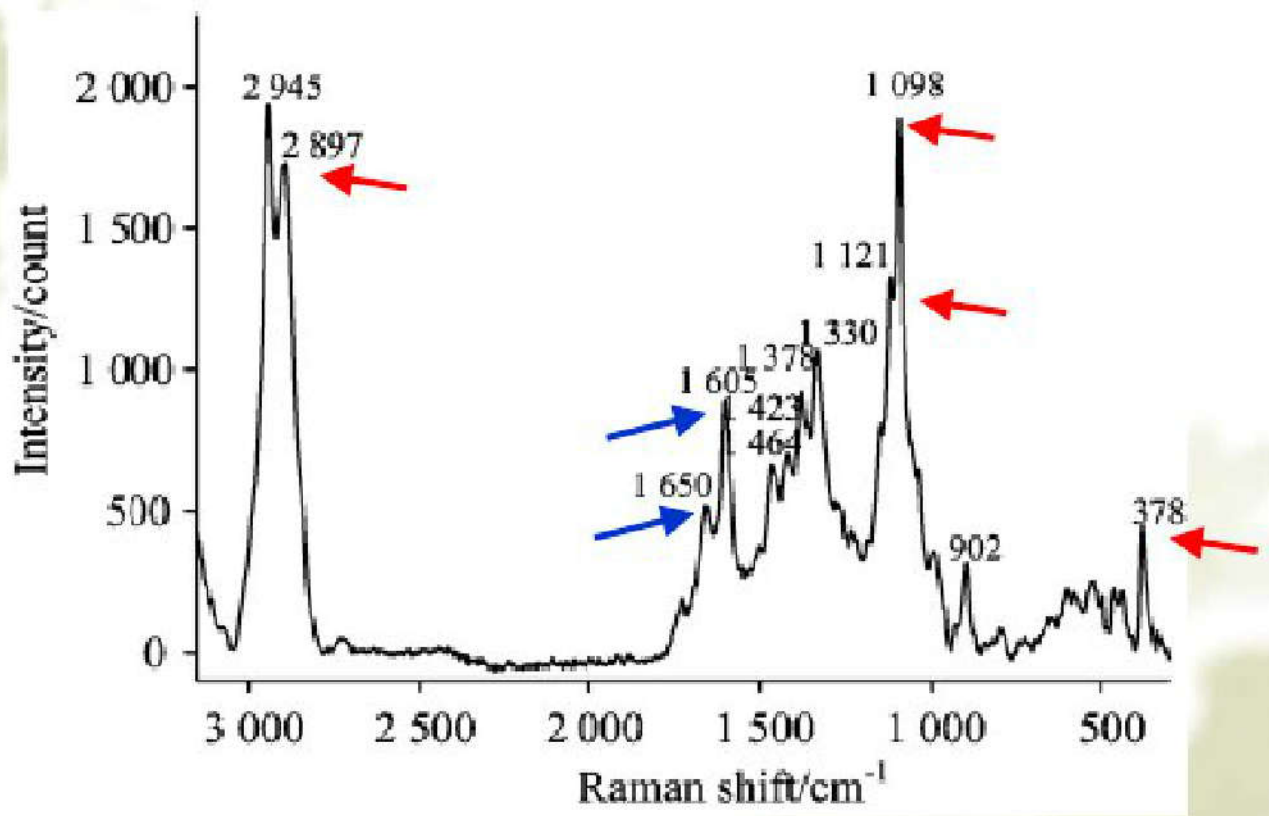


图 拉曼光谱仪及振动拉曼衍射光谱

例：结香纤维素与木素分布的显微激光拉曼光谱研究



采用透射电子显微镜（TEM）研究结香细胞壁的超微结构



S₂层的拉曼衍射光谱

- ❖ **纤维素**的主要特征峰为2897、1121、1098、378 cm^{-1} ；**木素**的主要特征峰为1650 cm^{-1} 和1605 cm^{-1} 。
- ❖ 拉曼位移1650 cm^{-1} 归属为松柏醇 / 紫丁香醇和松柏醛 / 紫丁香醛结构，1605 cm^{-1} 处木素峰最强，归属于苯环的对称伸缩振动。

表 拉曼光谱信号的归属表

Frequency/cm ⁻¹	Component	Assignment
2 945	Lignin and Glucomannan	C—H stretching in OCH ₃ asymmetric
2 897	Cellulose	C—H and CH ₂ stretching
1 650	Lignin	Ring conjugated C—C stretching of coniferyl/sinapyl alcohol; C=O stretching of coniferaldehyde/sinapaldehyde
1 605	Lignin	Aryl ring stretching symmetric
1 464	Lignin and Cellulose	HCH and HOC bending
1 423	Lignin	O—CH ₃ deformation; CH ₂ scissoring; guaiacyl ring vibration
1 378	Cellulose	HCC, HCO and HOC bending
1 330	Lignin	Aryl-OH or aryl-O—CH ₃ vibration
1 121	Cellulose, Xylan, and Glucomannan	Heavy atom (CC and CO) stretching
1 098	Cellulose, Xylan, and Glucomannan	Heavy atom (CC and CO) stretching
902	Cellulose	Heavy atom (CC and CO) stretching
378	Cellulose	β-D-glucosides

3、质谱

- ❖ **质谱**（又叫质谱法，**Mass spectrometry**）是一种与光谱并列的谱学方法，通常意义上是指广泛应用于各个学科领域中通过制备、分离、检测气相离子来鉴定化合物的一种专门技术。
- ❖ 质谱法在一次分析中可提供丰富的结构信息，将分离技术与质谱法相结合是分离科学方法中的一项突破性进展。
- ❖ 在众多的分析测试方法中，质谱学方法被认为是一种同时具备高特异性和高灵敏度且得到了广泛应用的普适性方法。
- ❖ 质谱仪器一般由样品导入系统、离子源、质量分析器、检测器、数据处理系统等部分组成。

- ❖ 世界上第一台质谱仪于**1912**年由英国物理学家**Joseph John Thomson**（**1906**年诺贝尔物理学奖获得者、英国剑桥大学教授）研制成功。
- ❖ 到**20**世纪**20**年代，质谱逐渐成为一种分析手段，被化学家采用；从**40**年代开始，质谱广泛用于有机物质分析。
- ❖ 在早期的质谱研究中，涉及的样品一般为无机物，检测目的包括测定原子量、同位素丰度、确定元素组成等。
- ❖ 目前质谱的检测对象主要是有机物和生命活性物质，需要用到一些比较特殊（相对于**AES** 激发源）的电离源。



质谱仪

气相色谱-质谱联用快速检测葡萄酒农药残留

- ❖ 采用气相色谱/质谱选择离子模式分析葡萄酒样本和14种农药的基质匹配混合标准溶液（0.01、0.1、1.0、5.0和10 ug/mL），建立各化合物的标准工作曲线。
- ❖ 每种农药选择2~3个扫描离子，通过保留时间和特征离子及其丰度比对目标农药进行定性，标准工作曲线法定量。

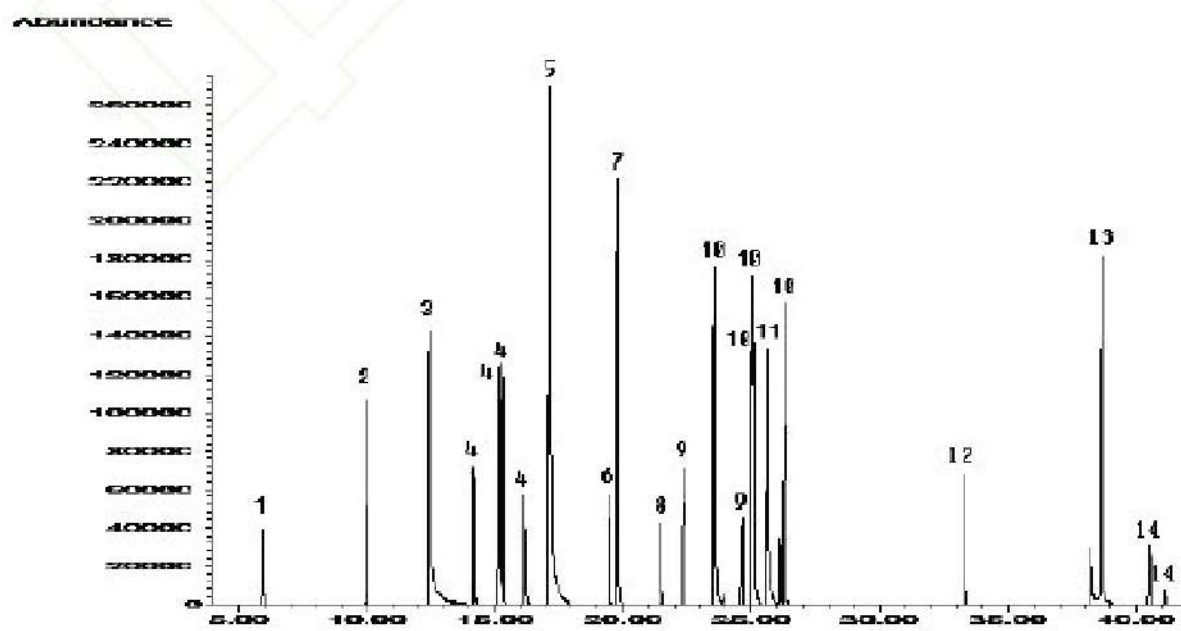


图1 14种农药混合标准溶液的总离子流色谱图 (5 mg/L)

注：1.残杀威(propoxur)；2.异丙威(isoprocarb)；3.仲丁威(fenobucarb)；4.六六六(hexachloro-cyclohexane soproicide, HCH)；5.抗蚜威(pirimicarb)；6.马拉硫磷(malathion)；7.毒死蜱(chlorpyrifos)；8.啶硫磷(quinalphos)；

4、红外光谱

- ❖ 利用物质对红外光波的吸收进行定性及定量分析。由于不同的物质具有不同的化学键，其吸收波长不同，而对光波吸收的多少与物质的量成正比，因此可以用来定量。
- ❖ **红外光谱** (Infrared Spectroscopy, IR) 的研究开始于 20 世纪初期，自 1940 年商品红外光谱仪问世以来，红外光谱在有机化学研究中得到广泛的应用。
- ❖ 到 70 年代，在电子计算机蓬勃发展的基础上，傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 实验技术进入现代化学家的实验室，成为结构分析的重要工具。
- ❖ 该技术以高灵敏度、高分辨率、快速扫描、联机操作和高度计算机化的全新面貌使经典的红外光谱技术再获新生。



傅立叶变换红外光谱仪

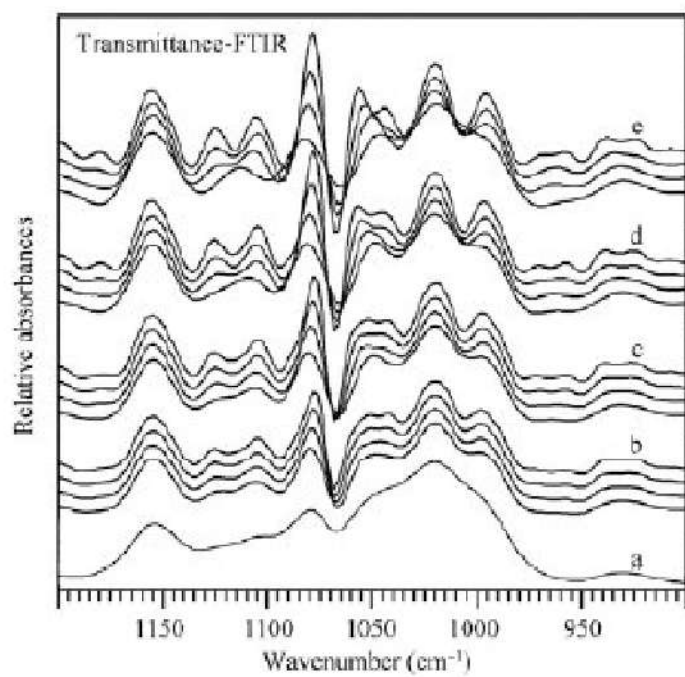
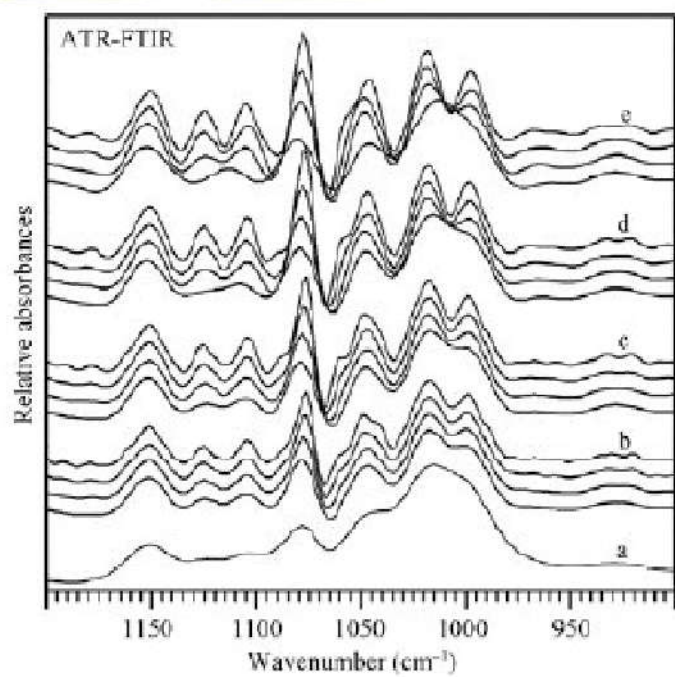


图 1 水稻淀粉 FTIR 原始波谱和去卷积波谱

- ❖ 傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)用于研究淀粉粒的有序结构,包括透射模式和衰减全反射模式2种。
- ❖ 天然淀粉晶体类型不同,其FTIR波谱也有差异。
- ❖ 淀粉中水分含量超过60%时,水分含量对ATR-FTIR波谱没有影响。
- ❖ 酸水解降解淀粉无定形结构成分比有序结构成分快,提高淀粉的有序度。
- ❖ 淀粉葡萄糖苷酶水解淀粉对淀粉外部区域的有序度影响不大,但明显提高整个淀粉的有序度。

四、金属基复合材料的界面改性

- ❖ 金属基复合材料的特点是容易发生界面反应而
- ❖ _____ 出现某些元素在界面上富集的现象（成分偏析）。

金属基复合材料的界面控制主要有以下两方面：

在碳纤维增强Al基复合材料中，在碳纤维上涂Ti-B
涂层；在碳纤维增强Mg基复合材料中采用SiO₂作涂层；
在碳纤维增强Al基复合材料中用SiC涂层等都是在增强材

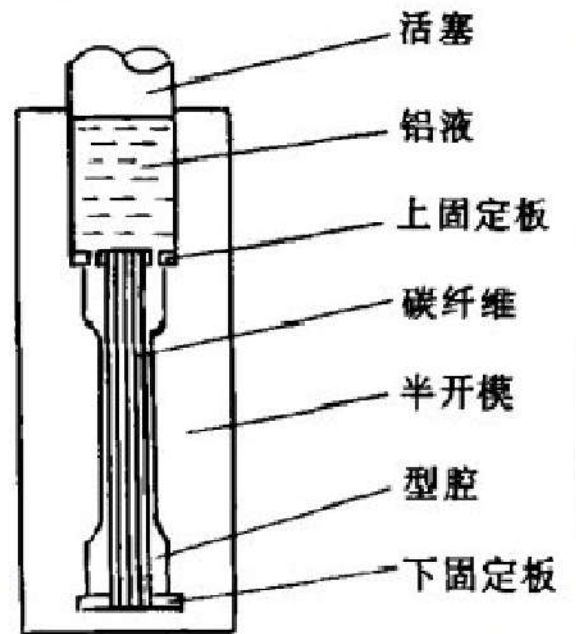
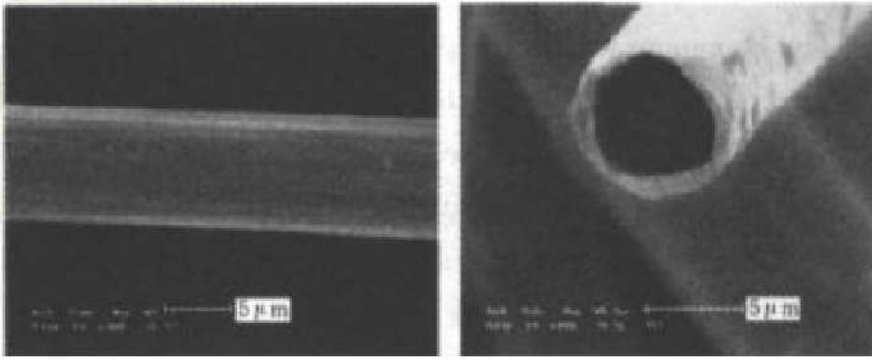


图1 电镀镍碳纤维-铝基复合材料

在C/A1复合材料中，常用含Ti的Al合金，由于Ti的富

- 人们一直非常重视**界面的研究**，并有大量的文献报道，但由于**材料的多样化及界面的复杂性**，至今尚无一个**普遍性的理论**来说明复合材料的界面行为。
- 对复合材料来讲，**材料组元之间相互浸润**是复合的首要条件。
- 在制备**金属基复合材料**时，**液态金属**对增强材料的浸润性，直接影响到**界面粘结强度**。

2.6 复合材料界面及其改性

- ❖ 界面的基本概念
- ❖ 复合材料的界面粘结机理
- ❖ 聚合物基复合材料的界面改性
- ❖ 金属基复合材料的界面改性
- ❖ 层状复合材料的界面

思考题

- 1、聚合物基复合材料的界面有哪些特点？
- 2、避免金属基复合材料界面过度化学反应的措施有哪些？



